

Результаты исследований сезонного протаивания пород в районе пос. Лорино (Восточная Чукотка)

Маслаков Алексей Алексеевич

аспирант, кафедра криолитологии и гляциологии, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

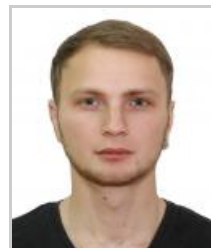
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, каб. 1910

Maslakov Alexey

Postgraduate at the Department of Cryolithology and Glaciology of Geographical Faculty of Moscow State University

119991, Russia, Moscow, ul. Leninskie Gory, 1, room 1910

✉ alekseymaslakov@yandex.ru



[Статья из рубрики "Грунты холодных регионов"](#)

Аннотация. Объектом исследования в данной статье является сезонноталый слой - верхний горизонт пород, протаивающий летом и распространённый в пределах криолитозоны. Предметом исследования является определение закономерностей пространственно-временного распространения глубины сезонного протаивания и выявление природных факторов, определяющих интенсивность этого явления. Работа основывается на результатах комплексных полевых исследований, проведённых на мониторинговой площадке вблизи посёлка Лорино на востоке Чукотки за 2010 - 2015 гг. и отражающей природные условия приморских низменностей данного региона. Полевые измерения проводились по методике программы Циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя, с последующим статистическим анализом полученных данных. Новизна исследования заключается в получении фактических данных о пространственно-временной вариации глубин сезонного протаивания, полученных в результате полевых режимных наблюдений в относительно слабо изученном регионе Восточной Чукотки. Основными выводами исследований являются полученные закономерности пространственно-временного распространения глубины сезонного протаивания и взаимосвязи природных (прежде всего, климатических) характеристик с мощностью сезонноталого слоя.

Ключевые слова: сезонноталый слой, многолетнемёрзлые породы, Чукотка, климат, Лорино, КАЛМ, тундра, торфяник, климатическая вариабельность, изменения климата

УДК: 551.34

DOI: 10.7256/2453-8922.2017.1.22482

Дата направления в редакцию: 29-03-2017

Дата публикации: 02-04-2017

Работа была выполнена при поддержке гранта NSF PLR-1304555, НИР AAAA-A16-116032810095-6 (камеральный этап) и в рамках темы Госзадания ЦЭПЛ РАН (№ 01201355191)

Abstract. The paper contains the results of active layer studies in Lorino monitoring site

(Eastern Chukotka, Russia), conducted in framework of the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program during 2010-2015. The study site includes tundra landscapes of Eastern Chukotka coastal lowlands. The main purpose of the paper is to obtain spatial and temporal patterns of seasonal melting distribution and reveal the main natural factors defining active layer depth within study site. The author demonstrates the predominance of thermal forcing in active layer development, which was strongly complicated by local (microrelief, vegetation, soil moisture, etc.) conditions. These factors determined high spatial and temporal variability of active layer thickness within single grid (100×100 m). The study also reveals the lack of statistical data on natural characteristics and the need for further detailed studies of seasonal melting process.

Keywords: climate variability, peatland, tundra, CALM, Lorino, climate, Chukotka, permafrost, active layer, climate change

Результаты исследований сезонного протаивания пород в районе пос. Лорино (Восточная Чукотка)

1. Введение

Сезонноталый слой (СТС) образуется в теплый период года в области криолитозоны и занимает промежуточное положение между атмосферой и многолетнемёрзлыми отложениями. Через СТС проходит большая часть теплооборотов в земную кору [1] и потому он чутко реагирует на изменения погоды и климата. Хорошо исследованные факторы, определяющие промерзание и протаивание пород позволяют с высокой достоверностью рассчитывать средние региональные значения толщины сезонноталого слоя [2, 3], однако, высокая изменчивость этих факторов в пределах единого ландшафтного уровня приводит к значительным вариациям расчетной глубины сезонного протаивания [4]. Она чрезвычайно изменчива в пространстве и времени [4, 5]. Её междугодовая и многолетняя изменчивость связана с изменениями условий теплообмена пород с атмосферой, обусловленными прежде всего динамикой климата и эволюцией природных ландшафтов. На этом фоне фактические данные о мощности СТС играют исключительно важную роль в качестве опорных сведений о динамике сезонного протаивания и реакции сезонноталого слоя на вариации природных характеристик.

Целью статьи является анализ и обобщение полевых наблюдений и лабораторных исследований сезонного протаивания на мониторинговой площадке «Лорино» на востоке Чукотки за 2010-2015 гг.

2. Район исследований

Район исследований располагается на востоке Чукотки, в пределах полого-волнистой ледниково-морской равнины, примыкающей к сглаженным хребтам Чукотского нагорья (рис. 1). Восток Чукотки расположен в зоне субарктического и арктического морского климата [6]. Лето пасмурное и прохладное ($t_{\text{июл}} +8..+10^{\circ}\text{C}$), зима длинная, умеренно холодная ($t_{\text{янв}} -24...-26^{\circ}\text{C}$) [7]. Эта территория отличается постоянной повышенной относительной влажностью воздуха, пониженным испарением с поверхности суши, значительной облачностью, а в прибрежной полосе — частыми и затяжными туманами. В результате прибрежные районы летом получают меньше солнечного тепла, чем континентальные районы тех же широт [8]. Особенности климатических условий определили распространение мёрзлых пород на рассматриваемой территории.

Территория Восточной Чукотки относится к области сплошного распространения многолетнемёрзлых пород (ММП) [9]. Талики присутствуют лишь под крупными реками и озёрами. Температура многолетнемёрзлых пород в районе исследования колеблется в пределах $-3..-5^{\circ}\text{C}$, а ещё мощность варьирует от 100 до 300 м [10].

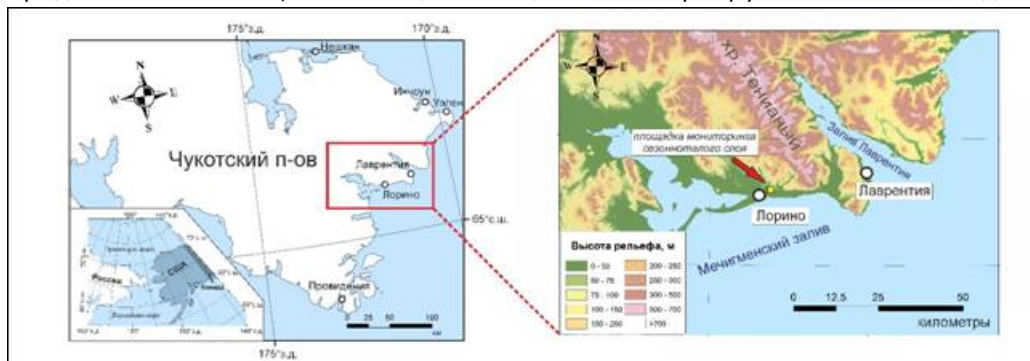


Рис. 1. Район исследований.

Растительность представлена тундровыми видами. Предгорья заняты пятнистой и «бороздчатой» кустарничково-лишайниковой тундрой [11, 12]. Здесь на склонах ложбин временных водотоков вместе с корковыми лишайниками распространены кустистые и листоватые лишайники, единичные экземпляры трав, приземистые и стелющиеся формы *Salix* и *Betula*. По пологим склонам и низким междуречьям широко распространены мелкопочечные тундры (высота кочек 15-20 см) с *Ereophorum Vaginatum* и *Carex lugens*. Понижения между бугорками, которые образуют группы кочек, заняты сфагновыми мочажинами с торфянистыми почвами. В долинах рек, на морских террасах, в глубоких ложбинах нижней части гор развиты кустарничково-травянистые тундры.

В ландшафтном плане эта территория представлена подзоной типичных тундр в речных долинах и на равнинах, а на более высоких отметках – лишайниковыми тундрами и гольцами [12].



Рис. 2. Площадка мониторинга сезонноталого слоя Лорино (фото Маслакова А.А., 2013 г.).

Исследования сезонного протаивания, приведённые в данной статье, ведутся на мониторинговой площадке «Лорино» ($65^{\circ}32'$ с.ш., $171^{\circ}38'$ з.д.) с 2010 года. Она расположена примерно в 4 километрах к северо-востоку от пос. Лорино, на водораздельной плоской заболоченной территории (рис. 2). Поверхность площадки находится на высоте 40-42 м над уровнем моря, практически без уклона, кочковатая, сильно заболоченная. Сезонноталый слой (СТС) практически по всей площадке представлен торфом. Согласно морским береговым обнажениям, расположенным в 2 км

от площадки, торфяной горизонт подстилается валунными суглинками. Растительность сильно зависит от микрорельефа: на сухих кочках присутствуют лишайниково-кустарничковые ассоциации, а в понижениях распространены осоково-сфагновые сообщества.

В целом, природная обстановка площадки Лорино отражают условия слабодренированных приморских низменностей Восточной Чукотки, а также территории Мечигмено-Колючинской депрессии.

3. Методика

3.1. Полевые методы

Площадка «Лорино» является одной из опорных точек исследований, проводимых в рамках программы Циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя (Circumpolar Active Layer Monitoring – CALM)^[13], насчитывающей сотни площадок в различных регионах криолитозоны Земли ^[14].

Полевые измерения глубины сезонного протаивания на площадке Лорино проводятся по стандартной методике программы CALM^[13]. Площадка имеет размеры 100 × 100 м, в которой точки измерений толщины СТС (узлы сетки) расположены на расстоянии 10 м друг от друга – всего 121 точка. Глубина протаивания в каждом узле определяется как среднее арифметическое 4 измерений стальным щупом вокруг неё. Как правило, измерения ведутся в период максимального летнего протаивания пород, в конце августа – начале сентября.

Измерения влажности поверхностного слоя почвы (0-7 см) ведутся на площадке Лорино при помощи приборов Vital Hydra logger и Thetha probe NH2 Moisture Meter, которые определяют объёмную влажность почвы через электропроводность. Измерения влажности проводятся аналогично замерам глубины СТС.

Наблюдения за температурным режимом сезонноталого слоя ведутся на площадке с 2012 г. при помощи термометрических датчиков-самописцев Hobo Data Logger на глубинах 2, 15, 25, 50, 75 и 100 см с интервалом каждый час.

3.2. Лабораторные методы

Лабораторные методы исследований включают в себя обработку и статистический анализ фактически измеренных величин, а также метеорологических параметров.

Для оценки влияния климатических факторов на глубину деятельного слоя, использовался т.н. индекс протаивания (degree days of thawing – DDT), представляющий собой сумму положительных среднесуточных температур с начала тёплого периода времени к моменту измерений. Корреляционная зависимость глубины сезонного протаивания (d_{th}) с DDT описывается вариантом задачи Стефана в виде уравнения ^[15]:

$$d_{th} = E\sqrt{DDT} \quad (1),$$

Где E – т.н. «эдафический фактор», определяющий теплофизические свойства поверхности и толщи оттаивающего грунта ^[16, 17]. DDT – сумма градусо-дней на момент проведения измерений с начала периода положительных температур воздуха до момента измерений, °С.

За начало тёплого периода принималась дата со среднесуточной температурой воздуха

выше нуля, после которой не наблюдалось периода с заморозками продолжительностью более 5 суток. Конец периода с положительными температурами аналогично приходился на последнюю дату с температурой выше ноля, после которой не было периодов оттепелей продолжительностью более 5 суток.

Ближайшая метеостанция от места проведения исследований расположена в посёлке Уэлен (см. рис. 1) на расстоянии около 100 км от площадки Лорино. Метеостанция расположена на берегу Чукотского моря и отгорожена горными массивами (в первую очередь, массив Дежнёва, макс. Н = 740 м). Таким образом, использование результатов прямых метеорологических измерений может заметно исказить реальные взаимосвязи параметров климата и деятельного слоя. Для получения среднесуточных значений температуры воздуха в районе исследований использовались данные реанализа по модели ERA-Interim [18], наилучшим образом согласующейся с прямыми наблюдениями в высоких широтах [19]. Коэффициент корреляции (R) значений DDT по метеостанции Уэлен с результатами реанализа составила 0,97 (n = 11). Однако критическим недостатком этой и прочих моделей для данного региона являются данные по зимним и летним осадкам, массив которых содержит большое количество ошибочных (чрезмерно высоких) значений, превышающие пределы погрешности, поэтому осадки использованы по данным метеостанции Уэлен.

Для оценки вклада различных факторов в межгодовую вариацию СТС, был проведён многофакторный регрессионный анализ и методом наименьших квадратов было построено линейное регрессионное уравнение. Зависимой величиной были максимальные за год глубины сезонного протаивания, а независимыми – метеорологические характеристики и влажность поверхностного слоя почвы.

Измерение мощности СТС на мониторинговых площадках CALM обуславливает пространственную и временную неоднородность в глубинах сезонного протаивания. Помимо стандартных величин (среднее, максимальное и минимальное значения, а также стандартное отклонение), в статье используются несколько характеристик, применяемых для статистического анализа данных по сезонному протаиванию [16, 20].

Для каждой мониторинговой площадки рассчитывался коэффициент вариации (CV), позволяющий определить степень разброса величин вокруг среднего значения:

$$CV = \sigma / \bar{a} \quad (2),$$

где σ – среднеквадратичное отклонение; $\bar{a}$ – среднее арифметическое значений СТС.

Межгодовая изменчивость (INV, %) значений СТС позволяет оценивать разброс значений СТС на площадке за рассматриваемый период времени. Этот параметр рассчитывается как разность между максимальным и минимальным значением нормализованного индекса вариабельности I_i для требуемого периода измерений. Индекс вариабельности рассчитывался по формуле:

$$I_i = \frac{(Z_i - Z_{avg})}{Z_{avg}} \quad (3),$$

где Z_i – значение СТС в точке i ; Z_{avg} – среднее значение СТС по площадке.

Согласно проведённым исследованиям [21], вариации СТС можно разделить на 3 группы: 1) низкая вариабельность при INV = 0-19%; 2) средняя - при INV = 20-29%; 3) высокая – при INV > 30%.

4. Результаты и дискуссия

4.1. Внутригодовая динамика сезонного протаивания

Внутригодовой ход сезонного протаивания зависит от воздействия различных факторов и природных условий. В первую очередь, это температура воздуха, которая определяет глубину и интенсивность развития сезонноталого слоя во времени, а также сроки его существования. На Восточной Чукотке сезонное протаивание начинается практически сразу после схода снежного покрова и установления положительных температур воздуха (рис. 3), обычно в конце мая – начале июня. Скорость продвижения подошвы талых пород зависит от времени: с поверхности протаивание происходит быстро (0,7 см/сут), затем, при увеличении глубины тепловые волны затухают, замедляя этот процесс (до 0,2 см/сут к середине августа) [20]. Максимальной толщины сезонноталый слой достигает в конце сентября – начале октября. Измерения температурного режима сезонноталого слоя показывают, что даты максимального развития СТС практически совпадает со сроками окончания сезона протаивания (переход среднесуточных температур воздуха через 0°C). Тем не менее, талая прослойка продолжает существовать до ноября-декабря. В зимний период тепловое поле слоя сезонного протаивания формирует зимний ход температуры воздуха и снежный покров: чем он меньше и чем температура воздуха ниже – тем холоднее поверхностные горизонты пород.

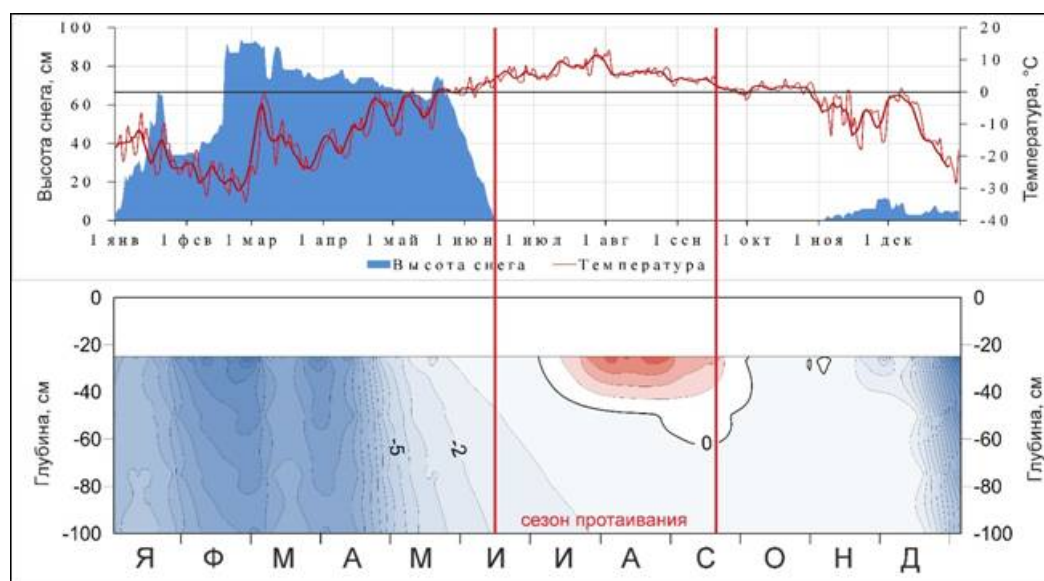


Рис. 3. Динамика сезонного протаивания в сопоставлении с годовым ходом температуры воздуха и высотой снежного покрова для площадки CALM Лорино за 2013 г.

Влияние термического фактора на сезонное протаивание пород хорошо демонстрирует рис. 4, на котором для площадки CALM Лорино прослеживается отчётливая линейная корреляция ($y = ax$) $\sqrt{\text{DDT}}$ с мощностью СТС, зафиксированные в процессе сезонного оттаивания. Коэффициент аппроксимации (R^2) превышает 0,9. Коэффициент a в уравнениях линий тренда есть не что иное, как эдафический фактор E , определяемый теплофизическими свойствами поверхности и толщи оттаивающего грунта. Для площадки Лорино он составляет 1,9.

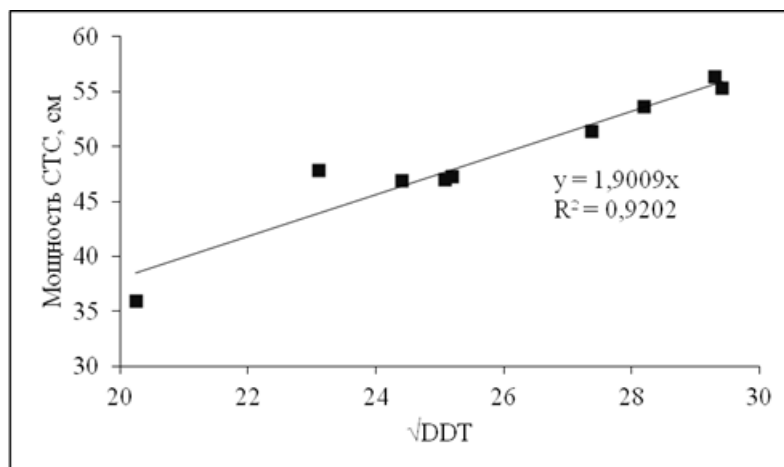


Рис. 4. Связь глубины сезонного протаивания с индексом протаивания ($\sqrt{DDT}$) для площадки CALM Лорино

4.2. Межгодовая динамика сезонного протаивания

Среднее значение мощности СТС на площадке Лорино за 2010-2015 гг. составило $51 \pm 10,3$ см при разбросе 59 см, или 123% от глубины протаивания (рис. 5). Коэффициент вариации (CV) составляет 20% (значительная степень рассеивания данных); межгодовая вариабельность INV составляет 23% за 6 лет измерений. Годом с самыми высокими средними значениями мощности СТС был 2014 (56 ± 10 см,), а с самыми низкими – 2010-2012 гг. (47 см, $\sigma = 11, 10,3$ и $10,2$ соответственно).

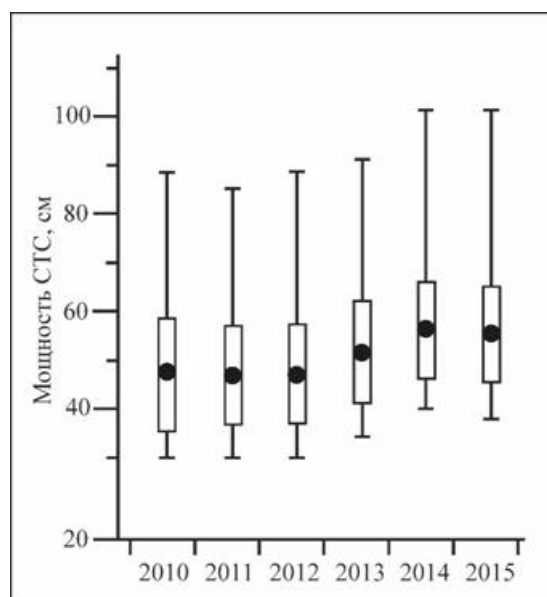


Рис. 5. Вариации глубин сезонного протаивания для площадки Лорино. Черные кружки – средние значения; прямоугольники – величина стандартного отклонения; линии – максимальные и минимальные значения СТС по площадке.

Отмечается, что межгодовые вариации глубин сезонного протаивания на площадке слабо коррелируют с метеорологическими параметрами (рис. 6). Максимальная мощность СТС достигала в 2014 году, который не характеризуется ни повышенными значениями индекса протаивания, ни экстремальным количеством летних осадков. В то же время, для 2010-2011 гг., характеризовавшихся одними из наименьших глубин сезонного протаивания, наблюдались самые высокие значения DDT за период наблюдений и повышенное количество летних осадков. Подобное отсутствие взаимосвязей требует проведения регрессионного анализа для выявления ведущих факторов, определяющих

межгодовую вариацию глубин сезонного протаивания

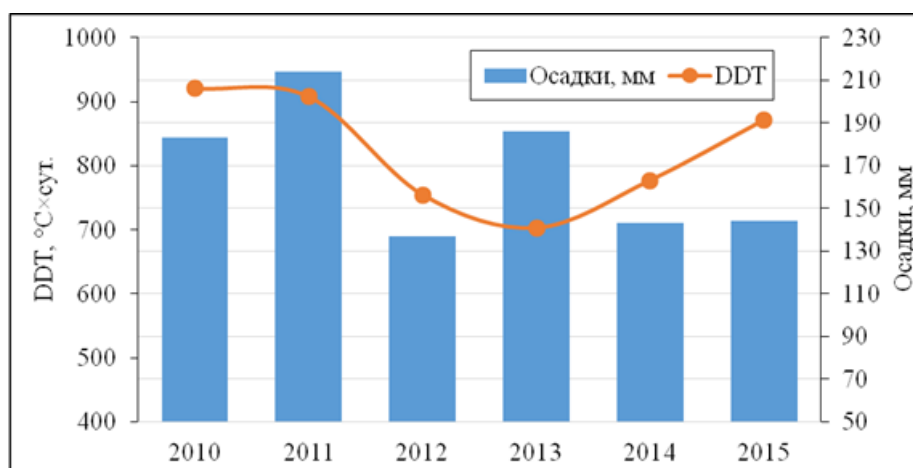


Рис. 6. Межгодовой ход индекса протаивания (DDT) и количества летних осадков в районе площадки Лорино (<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>)

4.3. Пространственная вариация глубин сезонного протаивания

Пространственная вариация глубин сезонного протаивания представлена на рис. 7. Из него видно, что площадка Лорино обладает слабым уклоном поверхности на юг, однако его недостаточно, чтобы препятствовать скоплению влаги. В результате в пределах площадки существуют участки мочажин и небольших луж, где средняя влажность почвы превышает 60%. (см. рис. 7 Б). Влажность поверхностного слоя почвы на кочках варьирует в пределах 10-20%. Области более глубокого сезонного протаивания приурочены к юго-восточной окраине площадки, где вблизи подошвы СТС торфяные отложения фациально переходят в суглинистые (см. рис. 7 В, Г). Наименьшее протаивание характерно для сухих торфяных кочек. Корреляция мощности СТС и влажности поверхностного слоя почвы (0-7 см) выявило отсутствие взаимосвязи ($R = 0,12$, $n = 121$). Однако визуальное разделение узлов измерений на сухие кочки (К) и влажные мочажины (М) во время полевых измерений 2013 года позволило выявить некоторую дифференциацию глубин протаивания: средняя глубина сезонного протаивания под кочками (39 точек) составила 48 ± 11 см, а под мочажинами (34 точки) – 55 ± 9 см, что подтверждает тезис о более быстром протаивании влажных пород, чем сухих [22]. Более подробное изучение пространственного распределения глубин сезонного протаивания в будущем требует рассмотрения дополнительных природных факторов. На фоне относительной однородности литологического состава отложений, слагающих сезонноталый слой (торф) и слабой расчленённости поверхности, такими факторами могут быть микрорельеф и растительный покров [23].

4.4. Факторы, определяющие вариацию мощности сезонноталого слоя

Как было указано выше, для оценки вклада ведущих факторов, влияющих на межгодовую динамику мощности СТС на мониторинговой площадке CALM Лорино был проведён множественный регрессионный анализ. Зависимой величиной (х) были максимальные за год глубины сезонного протаивания, а независимыми – влажность поверхностного слоя почвы и метеорологические характеристики: длительность периода оттаивания, количество летних и зимних осадков, индекс промерзания (DDF) и индекс протаивания (DDT).

Уравнение регрессии для площадки Лорино выглядит следующим образом:

$$d = 1,995 \times \sqrt{DDT} + 0,012 \times P_s + 0,015 \times P_w - 6,57 \quad (4),$$

где d – глубина сезонного протаивания в конце тёплого периода, см; $\sqrt{DDT}$ – квадратный корень из индекса протаивания, $^{\circ}\text{C} \times \text{сут.}$; P_s – количество летних осадков, мм; P_w – количество зимних осадков.

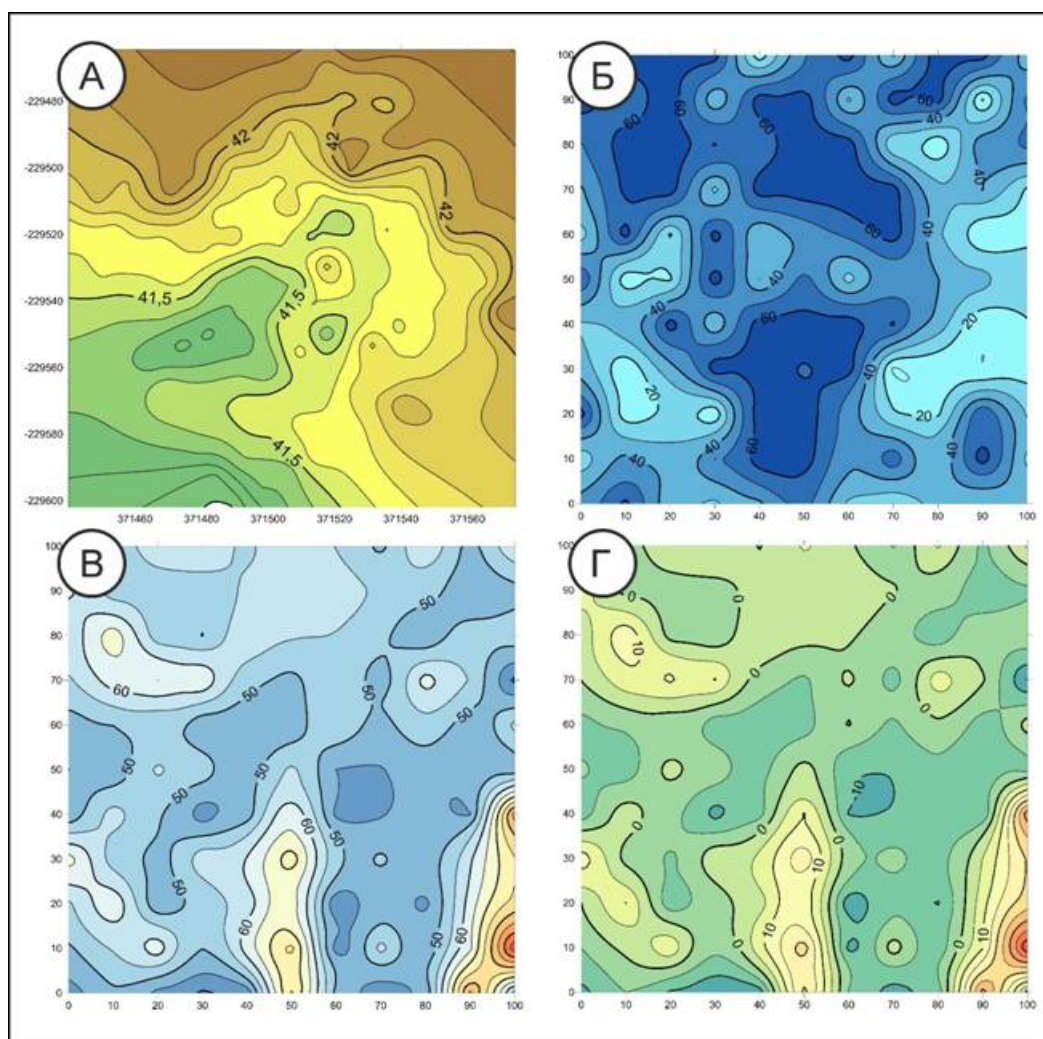


Рис. 7. Пространственная вариация (А) рельефа поверхности, м; (Б) поверхностной влажности почвы, %; (В) средней за 2010-2015 гг. глубины сезонного протаивания, см и (Г) аномалий сезонного протаивания относительно средних значений за 2010-2015 гг.

Коэффициент аппроксимации (R^2) составил 0,97 ($n = 6$), т.е. межгодовая вариация глубин сезонного протаивания на 97% определяется указанными параметрами. Рассчитанные по уравнению (4) глубины сезонного протаивания обладают статистической значимостью по критерию Стьюдента (t-тест; $p < 0,01$). Как видно из уравнения (4), подавляющий вклад (94%) в вариацию мощности СТС имеет термический фактор (DDT). Осадки, как летние, так и зимние также способствуют более глубокому сезонному протаиванию: чем выше влажность торфяных отложений, тем его теплопроводность выше [22].

5. Заключение и выводы

В работе были представлены результаты полевых и лабораторных исследований явления сезонного протаивания и его пространственно-временного проявления. На основе приведённого материала можно сформировать несколько основных выводов.

Было выявлено, что временную динамику сезонноталого слоя определяет температура воздуха: протаивание начинается при сходе снега и установлении положительных среднесуточных температур воздуха, достигая максимальных глубин к концу сезона протаивания ($T_{\text{ср сут}} < 0^{\circ}\text{C}$). Эдафический фактор для мониторинговой площадки Лорино составляет 1,9, определяя глубину проникновения положительных теплооборотов при определённых значениях индекса протаивания.

Выявлена чёткая линейная связь между индексом протаивания (DDT) и внутригодовым ходом глубины сезонного протаивания пород.

Представленные результаты полевых измерений за 2010-2015 гг. показывают высокую вариабельность мощности СТС в пределах площадки Лорино ($CV = 20\%$, $INV = 23\%$). Была также выявлена межгодовая флуктуация глубины сезонного протаивания, что легло в основу выявления ведущих природных факторов, определяющих динамику СТС.

Анализ пространственного распределения глубин сезонного протаивания в пределах площадки Лорино, не позволил с высокой долей достоверности определить роль различных природных факторов, обуславливающих мощность СТС. Однако на основе визуальных наблюдений в 2013 году было выявлено, что под относительно сухими кочками глубина протаивания оказалась меньше (48 ± 11 см), чем под мочажинами (55 ± 9 см). Также, в результате полевых наблюдений, было определено, что повышенные значения мощности СТС на юго-восточной окраине площадки вызвано частичным замещением торфяных отложений суглинистыми.

На фоне кажущегося отсутствия взаимосвязи межгодовых вариаций толщины СТС и метеорологических характеристик, регрессионный анализ выявил, что флуктуации глубин сезонного протаивания на площадке на 97% определяются температурой воздуха и длительностью сезона протаивания (вклад 94%) и количеством летних и зимних осадков (вклад 3%).

Проведённые исследования выявили ряд закономерностей развития сезонноталого слоя, однако недостаток статистических массивов данных по другим параметрам, определяющим протаивание пород (микрорельеф, растительность, влажность/льдистость пород по всей толщине СТС и т. д.) требует дальнейших детальных исследований на мониторинговой площадке CALM Лорино.

6. Благодарности

Автор выражает благодарность д.б.н. Замолотчикову Д.Г., к.г.н. Краеву Г.Н. и Зеленскому Г.М. за всестороннюю помощь в проведении полевых работ и аналитических процедур.

Библиография

1. Павлов А. В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М, 1965. 254 с.
2. Anisimov, O. A., Shiklomanov, N. I., & Nelson, F. E. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models // Global and Planetary Change. 1997. №15(3). P. 61-77.
3. Bonnaventure, P. P., & Lamoureux, S. F. (2013). The active layer: A conceptual review of monitoring, modelling techniques and changes in a warming climate. Progress in Physical Geography, DOI: 10.1177/0309133313478314.
4. Hinkel, K. M., and F. E. Nelson, Spatial and temporal patterns of active layer thickness

- at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in northern Alaska, 1995–2000 // J. Geophys. Res. 2003. №108(D2), 8168, doi:10.1029/2001JD000927.
5. Пармузин С. Ю., Шаталова Т. Ю. Динамика сезонноталого и сезонномёрзлого слоёв пород в связи с короткопериодными колебаниями климата // Основы геокриологии. Ч. 4. Динамическая геокриология / Под ред. Э. Д. Ершова. М.:, 2001. С. 284-303.
 6. Алисов Б.П. Климат СССР. – М.: «Высшая школа», 1969. – 103 с.
 7. Автоматизированная Информационная Система Обработки Режимной Информации (АИСОРИ), авторы Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеиц Н.В. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>
 8. Кобышева Н. В. Климат России. – Санкт-Петербург: Гидрометиздат, 2001. – 654 с.
 9. Колесников С. Ф., Плахт И. Р. Чукотский район / Региональная криолитология / под ред. А. И. Попова. – М.: изд-во МГУ, 1989. – С. 201-217.
 10. Афанасенко В.Е., Замолотчикова С. А., Тишин М. И., Зуев И. А. Северо-Чукотский регион / Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Ершов Э. Д. – М.: «Недра», 1989. – С. 280-293.
 11. Пармузин С. Ю. Дальний Северо-Восток // Физико-географическое районирование СССР / Под ред. Н.А. Гвоздецкого. – М.: 1968. – С. 481-503.
 12. Исаченко А. Г. Ландшафты СССР. – Л.: изд. Ленинградского ун-та, 1985. – 320 с.
 13. Brown, J., K. M. Hinkel, and F. E. Nelson, The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results, *Polar Geogr.*, 24(3), 165–258, 2000.
 14. Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/> .
 15. Harlan, R. L. and J. F. Nixon. "Ground thermal regime," in: O. B. Andersland and D. M. Anderson, eds., *Geotechnical Engineering for Cold Regions*. New York, NY: McGraw-Hill, 1978, pp. 103-163.
 16. Hinkel, K. M., and F. E. Nelson, Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in northern Alaska, 1995–2000, *J. Geophys. Res.*, 108(D2), 8168, doi:10.1029/2001JD000927, 2003.
 17. Nelson, F. E., & Outcalt, S. I. (1987). A computational method for prediction and regionalization of permafrost. *Arctic and Alpine Research*, 279-288.
 18. Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balsameda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen I, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N, Vitart F.. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2011, vol.137, p. 553–597.
 19. Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J.. Evaluation of Seven Different Atmospheric Reanalysis Products in the Arctic. *Journal of Climate*. 2014. V. 27. 2588-2608.
 20. Zamolodchikov D. G., Kotov A. N., Karelin D. V. & Razzhivin V. Yu. (2004) Active-Layer Monitoring in Northeast Russia: Spatial, Seasonal, and Interannual Variability, *Polar Geography*, 28:4, 286-307, DOI: 10.1080/789610207.
 21. Smith S.L., Wolfe S.A., Riseborough D.W., Nixon M (2009). Active-Layer Characteristics and Summer Climatic Indices, Mackenzie Valley, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and Periglacial processes*, 20, 201-220.

22. Общее мерзлотоведение: Учебное пособие / под ред. Кудрявцева В. А. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 464 с.
23. Тыртиков, А. П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. – М.: Изд. Моск. ун-та, 1969. – 192 с

References (transliterated)

1. Pavlov A. V. Teploobmen promerzayushchikh i protaivayushchikh gruntov s atmosferoi. M, 1965. 254 s.
2. Anisimov, O. A., Shiklomanov, N. I., & Nelson, F. E. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models // Global and Planetary Change. 1997. №15(3). P. 61-77.
3. Bonnaventure, P. P., & Lamoureux, S. F. (2013). The active layer: A conceptual review of monitoring, modelling techniques and changes in a warming climate. Progress in Physical Geography, DOI: 10.1177/0309133313478314.
4. Hinkel, K. M., and F. E. Nelson, Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in northern Alaska, 1995–2000 // J. Geophys. Res. 2003. №108(D2), 8168, doi:10.1029/2001JD000927.
5. Parmuzin S. Yu., Shatalova T. Yu. Dinamika sezonnotalogo i sezonnomerzlogo sloev porod v svyazi s korotkoperiodnymi kolebaniyami klimata // Osnovy geokriologii. Ch. 4. Dinamicheskaya geokriologiya / Pod red. E. D. Ershova. M.:, 2001. S. 284-303.
6. Alisov B.P. Klimat SSSR. – M.: «Vysshaya shkola», 1969. – 103 s.
7. Avtomatizirovannaya Informatsionnaya Sistema Obrabotki Rezhimnoi Informatsii (AISORI), avtory Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>
8. Kobysheva N. V. Klimat Rossii. – Sankt-Peterburg: Gidrometizdat, 2001. – 654 s.
9. Kolesnikov S. F., Plakht I. R. Chukotskii raion / Regional'naya kriolitologiya / pod red. A. I. Popova. – M.: izd-vo MGU, 1989. – S. 201-217.
10. Afanasenko V.E., Zamolotchikova S. A., Tishin M. I., Zuev I. A. Severo-Chukotskii region / Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'nii Vostok / Ershov E. D. – M.: «Nedra», 1989. – S. 280-293.
11. Parmuzin S. Yu. Dal'nii Severo-Vostok // Fiziko-geograficheskoe raionirovanie SSSR / Pod red. N.A. Gvozdetskogo. – M.: 1968. – S. 481-503.
12. Isachenko A. G. Landshafty SSSR. – L.: izd. Leningradskogo un-ta, 1985. – 320 s.
13. Brown, J., K. M. Hinkel, and F. E. Nelson, The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results, Polar Geogr., 24(3), 165–258, 2000.
14. Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/> .
15. Harlan, R. L. and J. F. Nixon. "Ground thermal regime," in: O. B. Andersland and D. M. Anderson, eds., Geotechnical Engineering for Cold Regions. New York, NY: McGraw-Hill, 1978, pp. 103-163.
16. Hinkel, K. M., and F. E. Nelson, Spatial and temporal patterns of active layer thickness at Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites in northern Alaska, 1995–2000, J. Geophys. Res., 108(D2), 8168, doi:10.1029/2001JD000927, 2003.
17. Nelson, F. E., & Outcalt, S. I. (1987). A computational method for prediction and regionalization of permafrost. Arctic and Alpine Research, 279-288.
18. Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balsameda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J,

- Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen I, Kallberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N, Vitart F.. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc., 2011, vol.137, p. 553–597.
19. Lindsay R., Wensnahan M., Schweiger A., Zhang J.. Evaluation of Seven Different Atmospheric Reanalysis Products in the Arctic. *Journal of Climate*. 2014. V. 27. 2588-2608.
20. Zamolodchikov D. G., Kotov A. N., Karelin D. V. & Razzhivin V. Yu. (2004) Active-Layer Monitoring in Northeast Russia: Spatial, Seasonal, and Interannual Variability, *Polar Geography*, 28:4, 286-307, DOI: 10.1080/789610207.
21. Smith S.L., Wolfe S.A., Riseborough D.W., Nixon M (2009). Active-Layer Characteristics and Summer Climatic Indices, Mackenzie Valley, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and Periglacial processes*, 20, 201-220.
22. Obshchee merzlotovedenie: Uchebnoe posobie / pod red. Kudryavtseva V. A. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1978. – 464 s.
23. Tyrtikov, A. P. Vliyanie rastitel'nogo pokrova na promerzanie i protaivanie gruntov. – M.: Izd. Mosk. un-ta, 1969. – 192 s